Validação Experimental de Modelos de Células Fotovoltaicas

Nuno Mota[1], VitalVilarinho[1], Nuno Cláudio[1], E. Margato[1,2,3], F. Sales Rodrigues[1,2]

[1] Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal
Tel: +351 218 317 010, Fax: +351 218 317 009
[2] Centro de Electrotecnia e Electrónica Industrial, Centro de Instrumentação e Controlo – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa,
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1 – 1950 – 062 Lisboa, Portugal
[3] Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais – 1049-001 Lisboa, Portugal
Tel: +351-21-8417215, Fax: +351-21-8417167

E-mail: nmota@deea.isel.ipl.pt, vvilarinho@deea.isel.ipl.pt, nclaudio@deea.isel.ipl.pt, efmargato@deea.isel.ipl.pt, ferodrigues@deea.isel.ipl.pt

Abstract In this paper, beginning with an introduction about photovoltaic conversion in solar cells, are presented results of measurements in photovoltaic panels that allow to obtain curves traducing panels performance.
It is also presented two models that permit characterize the behaviour of panels in solar energy conversion to electrical energy.
Conclusions are presented about the similarity between simulation based on models and experimental results.

Keywords Solar cells, Photovoltaic models, Incident radiation, Short-circuit current, Open circuit voltage.

1. Introdução

Células solares são dispositivos semicondutores que convertem a energia solar em energia eléctrica, utilizando a energia dos fotões na geração de pares electrão-lacuna.

Actualmente é possível encontrar, no mercado, células solares com eficiência de 15% a 18%, a custos compatíveis com os objectivos desejados. No entanto, a eficiência da conversão energia solar/energia eléctrica em painéis fotovoltaicos comerciais, que é o caso em análise, é da ordem de 10 a 15%, devido a perdas inerentes aos materiais envolvidos e aos circuitos eléctricos associados aos sistemas.

O espectro da radiação solar é constituído por diversas frequências, que vão desde os infravermelhos até às altas frequências (ultravioletas). No entanto, sabe-se que há uma quantidade considerável desta energia que não chega a atingir a superfície da terra, devido a diversos fenómenos de reflexão e atenuação pela camada de ozono e à absorção de raios infravermelhos pelas moléculas de H_2O, O_2 e CO_2 na atmosfera.

Devido aos fenómenos referidos, a radiação que chega à superfície da terra é constituída por três componentes, a radiação directa, que vem directamente do sol, a radiação difusa, proveniente de todo o céu excepto do disco solar e a radiação reflectida, proveniente da reflexão no solo e em objectos circundantes.

2. Células fotovoltaicas

No processo de conversão de energia que ocorre numa célula fotovoltaica, a radiação luminosa incidente origina partículas móveis carregadas, no semicondutor, que são separadas da sua estrutura produzindo corrente eléctrica.

As células fotovoltaicas são constituídas por silício, que é um material semicondutor, com características intermédias entre um condutor e um isolante.

A. Tipo de células

O silício monocristalino é o material mais usado na constituição das células fotovoltaicas, atingindo cerca de 60% do mercado. A sua eficiência na conversão de radiação solar em energia eléctrica é cerca de 15%.

O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de electrões e facilitam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída. Por este motivo o seu rendimento ronda os 12%. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício monocristalino.

A figura 1 mostra a superfície activa de uma célula fotovoltaica típica de silício cristalino. Tem a forma de um quadrado com cerca de 10 cm de lado e pesa aproximadamente 10 gramas.

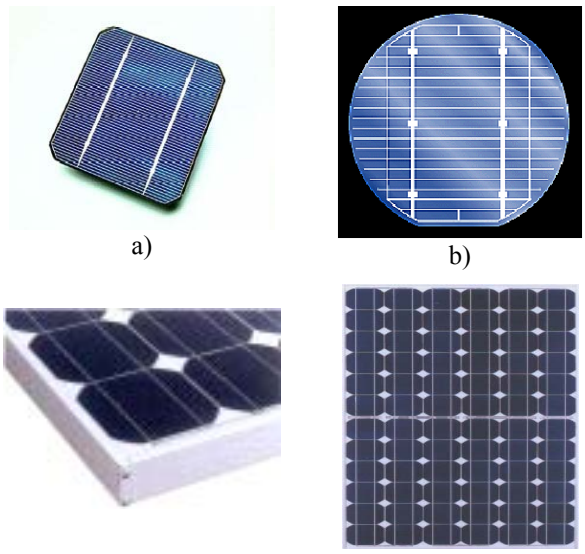

Figura 1 – a) Superfície activa de uma célula fotovoltaica típica; b) Pormenor da grelha colectora metálica na superfície; c) Aspecto exterior da célula utilizada

O silício amorfo não tem estrutura cristalina, apresentando defeitos estruturais que, em princípio, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas, uma vez que aqueles defeitos potenciam a recombinação dos pares electrão-lacuna. No entanto, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogénio, por um processo designado por hidrogenização, os átomos de hidrogénio combinam-se quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais.

O silício amorfo absorve a radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma fina película de silício amorfo sobre um substrato (vidro ou metal). Este processo de fabrico é ainda mais barato do que o do silício policristalino. Os equipamentos solares domésticos (calculadoras, relógios) são habitualmente feitos com células de silício amorfo, representando cerca de 4% do mercado. A sua eficiência na conversão da radiação solar em energia eléctrica é de cerca de 6%.

B. Novos materiais

Na área dos novos materiais para fabrico de células, os desenvolvimentos são constantes. O silício, material cuja utilização era consensual, começa a ser, cada vez mais, substituído por outros materiais. Uma das razões desta substituição é o custo da sua transformação, tarefa "suja" e tecnologicamente complexa e também o facto de a sua performance se degradar consideravelmente com a idade.

O futuro passa pela descoberta de novos materiais, mais baratos e eficientes. Prova disso é o facto de todos os grandes fabricantes de células fotovoltaicas terem já entrado no desenvolvimento de novos materiais.

Os materiais mais promissores são o Disselénio de Índio e Cobre e o Telurídio de Cádmio.

A BP®, líder mundial no fabrico de células fotovoltaicas, optou pelo Telurídio de Cádmio, que, embora não seja o material mais promissor, é bastante mais fácil de utilizar e tem menos problemas associados.

3. Apresentação e descrição dos ensaios do módulo fotovoltaico BP Solar® BP 2150 S

Pretende-se verificar, com os ensaios realizados, as diversas características eléctricas do sistema fotovoltaico estudado, constituído por 4 módulos (BP Solar® – BP 2150 S). Cada módulo apresenta as características constantes do catálogo do fabricante, que se indicam na tabela 1.

Tabela 1 – Característica do módulo fotovoltaico BP Solar® *BP 2150 S*

Silício monocristalino		
Potência máxima	P_{max}	150 W
Tensão máxima	V_{max}	34 V
Corrente máxima	I_{max}	4,45 A
Corrente de curto-circuito	I_{cc}	4,75 A
Tensão em circuito aberto	V_{ca}	42,8 V
Coeficiente de temperatura de I_{cc}	μI_{cc}	$65E^{-03}$ A/ºC
Coeficiente de temperatura de V_{ca}	μV_{ca}	$-160E^{-03}$ V/ºC
Coeficiente de temperatura de P_{max}	μP_{max}	-0,5 W/ºC
Temperatura normal de funcionamento	NOCT	47ºC
Comprimento	C	1,590 m
Largura	L	0,79 m
Área	A	1,256 m^2
Número de células em série	N_S	72

Com os ensaios realizados pretendeu-se atingir os seguintes objectivos:

- Obtenção da curva característica tensão-corrente;
- Determinação da variação da tensão em circuito aberto, Vca, e da corrente de curto-circuito, Icc, com a temperatura e com a intensidade da radiação incidente;
- Obtenção do ângulo de inclinação ideal, de acordo com a intensidade de radiação recolhida numa determinada época do ano;
- Verificação da relação existente entre a potência máxima, a radiação incidente e a temperatura.

As curvas características registadas, foram obtidas com a utilização de resistências variáveis, as quais simulam a carga introduzida no sistema.

Face a estes objectivos, foi executado um ensaio experimental com o esquema de ligações da figura 2.

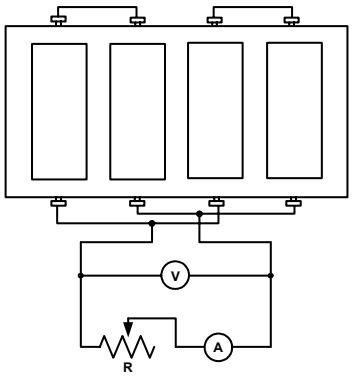

Figura 2 – Ligações efectuadas no ensaio

A. Descrição dos ensaios

Para diferentes graus de inclinação, são apresentados na tabela 2 valores de radiação solar incidente no piranómetro (aparelho utilizado para medir a intensidade da radiação solar incidente).

Tabela 2 – Valores de radiação solar/inclinação (*Março e Setembro de 2003, em Lisboa*)

Ângulo de inclinação (graus)	Radiação Solar (W/m2) (Março)	Radiação Solar (W/m2) (Setembro)
90	581.63	429.11
80	747.83	493.24
70	822.67	551.61
60	877.46	594.46
50	914.24	623.43
40	920.91	630.02
30	928.46	626.43
20	896.37	610.46
10	841.73	582.97
0	790.04	535.70

Como se pode constatar da tabela 2, as inclinações mais vantajosas para os meses de Março e Setembro são, respectivamente, 30º e 40º em relação ao solo.

Assim, o painel foi colocado com a inclinação de 30º e seguidamente foram retirados valores para a característica corrente-tensão. O ensaio consistiu na ligação em paralelo de duas séries de dois módulos, como se representa na figura 2.

As características I-V e P-V registadas são apresentadas na figura 3, tendo sido obtidas para um ângulo de 30 graus, uma radiação incidente de 650 W/m^2 e uma temperatura de 27,5ºC, em Março de 2003.

Na figura 4 ilustra-se a variação da curva I-V com a radiação incidente, para a unidade que tem vindo a ser analisada.

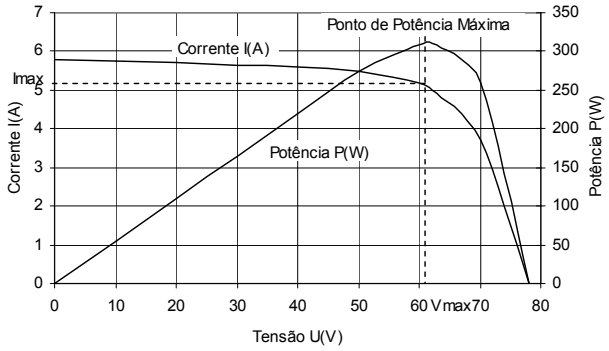

Figura 3 – Curvas características I-V e P-V

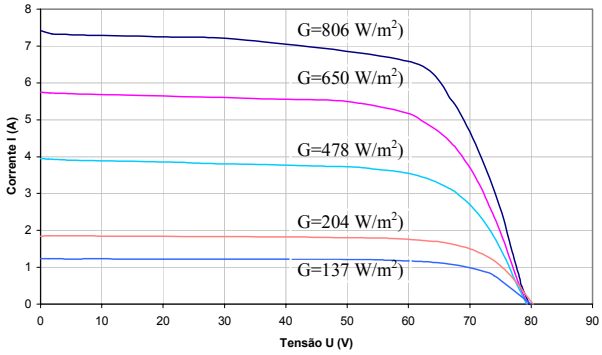

Figura 4 – Curva I-V com variação da radiação incidente; resultados experimentais (Março 2003)

Esta figura mostra que :

- A potência de saída aumenta com o aumento da radiação incidente, numa relação de 600(W)/1000(W/m^2);
- A corrente de curto-circuito varia linearmente com a radiação incidente;
- A tensão em circuito aberto varia pouco com a radiação incidente, sendo esta variação mais significativa para valores baixos de radiação incidente.

Na figura 5 ilustra-se a variação da potência e da temperatura, para a unidade que tem vindo a ser analisada, ao longo de um dia.

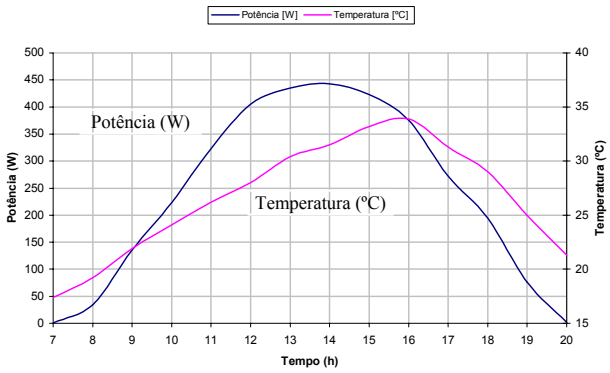

Figura 5 – Variação da potência e da temperatura ao longo do dia; resultados experimentais (Julho 2003)

Pode observar-se que:

- A potência de saída evolui ao longo do dia e apresenta o valor máximo às 14h ;
- A influência da temperatura na potência de saída é baixa.

Na figura 6 ilustra-se a variação da curva I-V com a temperatura para um módulo da unidade que tem vindo a ser analisada.

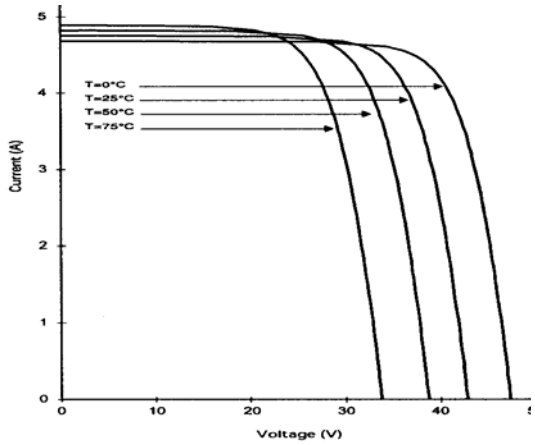

Figura 6 – Variação da curva I-V com a temperatura para um módulo; Fonte: BP Solar® (Fabricante)

Desta figura pode constatar-se que:

- A potência de saída decresce com o aumento da temperatura;
- A tensão em circuito aberto decresce com a temperatura (aproximadamente 0,2V/ºC);
- A corrente de curto-circuito varia muito pouco com a temperatura.

As figuras 7 e 8 mostram os resultados obtidos para a variação da potência máxima com a radiação incidente e com a temperatura.

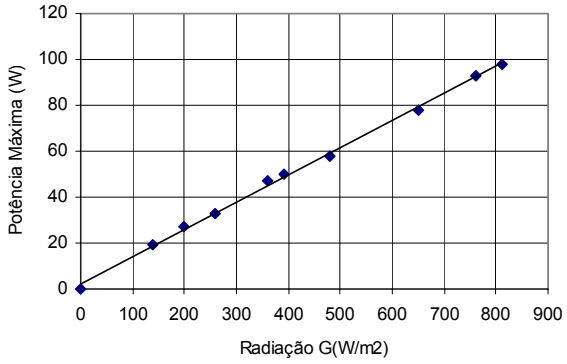

Figura 7 – Variação da potência máxima com a radiação incidente; Valores prático retirados do ensaio referentes a um módulo BP Solar® *BP 2150 S*

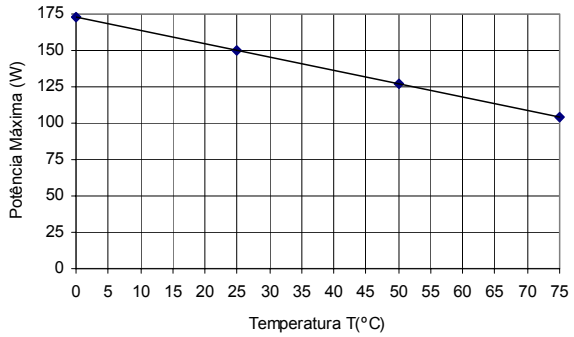

Figura 8 – Variação da potência máxima com a temperatura; G =1.000 W/m^2, com base na figura 6, dada pelo fabricante

Pode comprovar-se a acentuada diminuição da potência máxima quando a radiação solar incidente baixa; a diminuição da potência máxima com o aumento da temperatura é menos acentuada.

4. Modelos fotovoltaicos

Em qualquer simulação que envolva sistemas fotovoltaicos, uma escolha importante é a selecção do modelo a utilizar. Este modelo deve permitir a obtenção das características I-V, em função da temperatura ambiente e das condições de radiação incidente.

O primeiro modelo apresentado é um modelo extensamente usado como uma base semifísica, que trata um sistema FV como uma fonte de corrente dependente em paralelo com um díodo e com uma resistência em série.

Os quatro parâmetros que aparecem nas equações são respectivamente *Is*, corrente gerada pela fonte de corrente, *Rs*, resistência em série e as característica do díodo *Io* e *m*. Estes parâmetros, geralmente, não são incluídos nos dados fornecidos pelos fabricantes, pelo que devem ser determinados analiticamente com base nesses dados.

O segundo modelo que se apresenta é um modelo de cinco parâmetros, que corresponde a acrescentar uma resistência em paralelo, *Rp*, ao esquema inicial de quatro parâmetros. Este último modelo tem uma vantagem significativa, que é ser aplicável a sistema FV tanto com células cristalinas, como amorfas.

A. Modelo fotovoltaico de quatro parâmetros

Em termos de modelo simplificado, uma célula solar pode ser descrita através do circuito eléctrico equivalente apresentado na figura 9, que permite traduzir os diversos fenómenos que podem ocorrer no seu funcionamento.

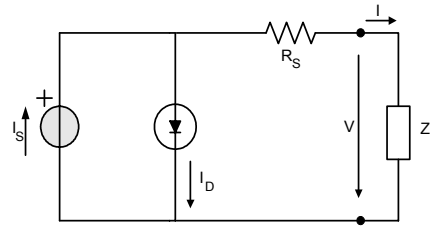

Figura 9 – Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z

A fonte de corrente, I_S, representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fotões, ao atingir a superfície activa da célula (efeito fotovoltaico); esta corrente unidireccional é constante para uma dada radiação incidente. A junção p-n funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidireccional I_D, que depende da tensão V aos terminais da célula.

A resistência em série R_S é um parâmetros de ajuste, que dá conta da queda de tensão interna que se observa numa célula.

A corrente I que percorre a carga é dada por:

$$I = I_S - I_D \tag{1}$$

A corrente no díodo I_D pode ser traduzida pela equação

$$I_D = I_0 \times \left(e^{\frac{V}{m \times V_T}} - 1 \right) \tag{2}$$

em que:

- I_0 – corrente inversa máxima de saturação do díodo;
- V – tensão aos terminais da célula;
- m – factor de idealidade do díodo (díodo ideal: m=1;díodo real: m>1); para um módulo constituído por N_S células em série, $m \geq N_S$;
- V_T – designado por potencial térmico

$$V_T = \frac{k \times T}{q}$$

Com:
- k: constante de Boltzmann ($1{,}3806 \times 10^{-23}$ J/K);
- T: temperatura absoluta da célula em K
- q: carga eléctrica do electrão ($1{,}6022 \times 10^{-19}$ C).

Pelo desenvolvimento das expressões anteriores e utilizando a expressão 1 como base, fica então :

$$I = I_S - I_D = I_S - I_0 \left(e^{\frac{V + R_S \times I}{m \times V_T}} - 1 \right) \tag{3}$$

Esta expressão define as características I-V para este modelo de quatro-parâmetros. Note-se que a corrente inversa máxima de saturação do díodo pode ser escrita em termos de características do material e temperatura:

$$I_0 = D \times T^3 \times e^{\left(-\frac{q \times \varepsilon}{A \times k \times T} \right)} \tag{4}$$

A constante A corresponde ao quociente de m pelo número de células integradas em série no módulo, Ns:

$$A = \frac{m}{N_S} \tag{5}$$

D é uma constante e ε é a energia (barreira de potencial) do semicondutor, 1,12 eV para o silício. Dois dos parâmetros do modelo, Rs e m, são considerados como constantes. O parâmetro A tem o valor 1, porque considerámos o díodo ideal. Porém, os outros dois parâmetros são função das condições operacionais do sistema FV. I_0 altera-se com a temperatura (T) e I_S é função da radiação incidente (G).

Face a valores de referência, com temperatura T = 298 K e radiação G = 1000 W/m^2, I_0 e I_S são determinados como se segue:

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \tag{6}$$

$$I_S = I_{S,ref} \times \frac{G}{G_{ref}} \tag{7}$$

As equações 6 e 7 podem ser usadas para caracterizar o comportamento corrente-tensão do modelo em qualquer condição de temperatura e radiação incidente, assumindo que os valores dos quatro parâmetros $I_{S,ref}$, $I_{0,ref}$, m e R_S são conhecidos. Porém, estes não são facilmente medidos, e também não são fornecidos pelo fabricante. Então devem ser determinados de outra forma, podendo ser obtidos facilmente a partir de dados do fabricante.

Para tal recorre-se a um sistema de três equações, provenientes da expressão (3), que correspondem, respectivamente, ao circuito em vazio, à condição de curto-circuito e à potência máxima :

$$0 = I_{S,ref} - I_{0,ref} \times \left[e^{\left(\frac{q \times V_{ca,ref}}{m \times k \times T_{ref}} \right)} - 1 \right] \tag{8}$$

$$I_{cc,ref} = I_{S,ref} - I_{0,ref} \times \left[e^{\left(\frac{q \times I_{cc,ref} \times R_s}{m \times k \times T_{ref}} \right)} - 1 \right] \tag{9}$$

$$I_{\max,ref} = I_{S,ref} - I_{0,ref} \times \left[e^{\left(\frac{q \left(V_{\max,ref} + I_{\max} \times R_S \right)}{m \times k \times T_{ref}} \right)} - 1 \right] \tag{10}$$

A corrente inversa de saturação do díodo tem um valor muito reduzido, na ordem de 10^{-5} ou 10^{-6}A, pelo que minimiza o termo exponencial na equação (9). Assim

pode-se assumir seguramente que a corrente I_S iguala a corrente de curto-circuito :

$$I_{S,ref} \approx I_{cc,ref} \qquad (11)$$

Através da equação (8), retira-se o valor de I_0. Com este valor e com I_S retirado da equação (11), substitui-se na equação (10) e retira-se o valor de R_S.

Os valores de I_S, R_S, I_0 e m são características das células de cada módulo fotovoltaico e podem ser encontrados a partir das equações anteriores e de dados fornecidos pelo fabricante do módulo (tabela 3).

Tabela 3 – Características calculadas para o módulo

Resistência série	R_S	0,011Ω
Factor de idealidade do díodo ideal	m	1
Corrente fotovoltaica	I_S	4,75A
Corrente inversa de saturação do díodo	I_0	$0{,}5087E^{-5}$A

B. *Comparação com os resultados experimentais*

Tem interesse avaliar o desempenho do modelo apresentado, por comparação com os resultados experimentais. Na figura 3 apresentaram-se os resultados experimentais obtidos para as características I-V e P-V do conjunto de módulos ligados como se apresenta na figura 2, constituídos por células fotovoltaicas de silício monocristalino de alta eficiência. As condições de teste experimental estão indicadas na tabela 4.

Na simulação, a temperatura da célula é calculado através da expressão

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G(NOCT - 20)}{800} \qquad (12)$$

em que :

- θc – temperatura da célula (ºC);
- θa – temperatura ambiente (ºC);
- G – radiação solar incidente (W/m^2);
- *NOCT* – temperatura normal de funcionamento da célula (*Nominal Operating Cell Temperature*); este valor é dado pelo fabricante e representa a temperatura atingida pela célula em condições normais de funcionamento, definidas como θa = 20ºC (temperatura ambiente) e G = 800 W/m^2 (radiação solar)

Tabela 4 – Condições de teste experimental e de simulação

	Teste prático (módulos)	**Teste Prático (1 célula)**	**Simulação**
G (W/m^2)	650	650	650
Icc (A)	5,746	2,873	2,92
Vca (V)	79,34	0,55	0,547
Temp (ºC)	27,5 (ambiente)	49,4 (célula)	49,4

O valor de I_0 é calculado pela expressão 6. Pela expressão 7 é calculado o valor de I_S que é igual a *Icc*. Obtém-se um valor superior ao apresentado no tabela 4, mas devido às perdas no circuito o valor utilizado é o valor encontrado na prática.

Na figura 10 mostra-se os resultados experimentais e os resultados da simulação para a característica I-V.

Pode verificar-se que o modelo de quatro parâmetros, considerando o díodo ideal, conduz a uma aproximação dos resultados experimentais que se caracteriza por alguns desvios relativos. Na realidade o díodo nunca é ideal, pelo que a simulação com m=2, caracteriza um díodo real e com resultados que, em termos comparativos, melhoram substancialmente.

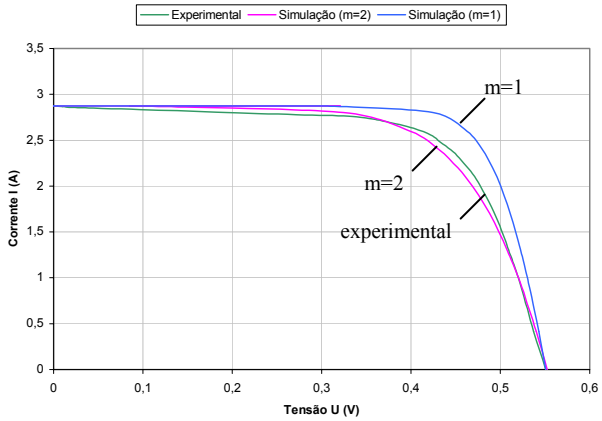

Figura 10 – Curva I-V de uma célula fotovoltaica; comparação com resultados experimentais

C. *Influência da temperatura e da radiação*

A validade do modelo de quatro parâmetros pode ser testada, analisando o seu comportamento com variações de temperatura e de radiação. Para o efeito, a corrente inversa de saturação pode ser traduzida em termos da temperatura, através da equação (4).

A corrente de curto-circuito é função da radiação incidente, podendo o seu valor ser calculado pela equação (7).

Os resultados da simulação da influência da temperatura e da radiação incidente na curva I-V da célula são representados, respectivamente, nas figuras (11) e (12).

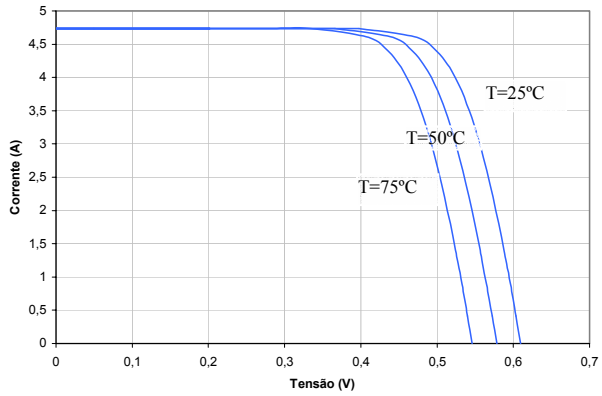

Figura 11 – Simulação da curva I-V com a variação da temperatura; G = G^r

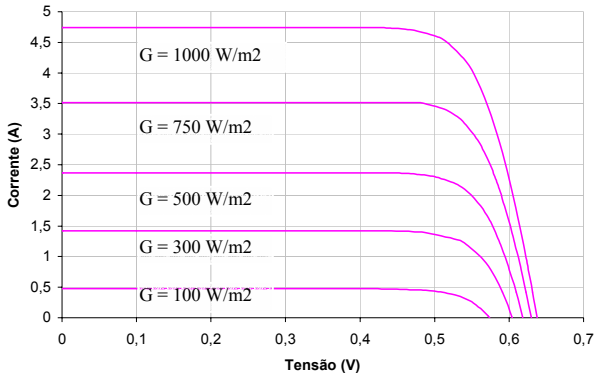

Figura 12 – Simulação da curva I-V com a variação da radiação incidente; T = Tr

A observação destas figuras permite constatar o bom desempenho do modelo na reprodução das curvas I-V. É de comparar, respectivamente, com as figuras 6 e 4.

A partir das simulações realizadas pode-se calcular a variação da potência máxima com a temperatura e com a radiação incidente. Os resultados obtidos sã apresentados, respectivamente, nas figuras 13 e 14.

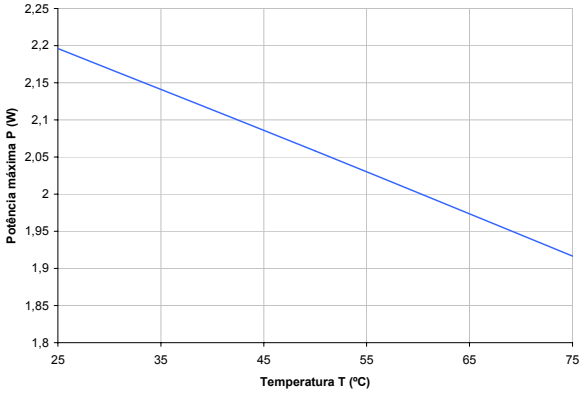

Figura 13 – Simulação da variação da potência máxima com a temperatura de uma célula; G = G^r

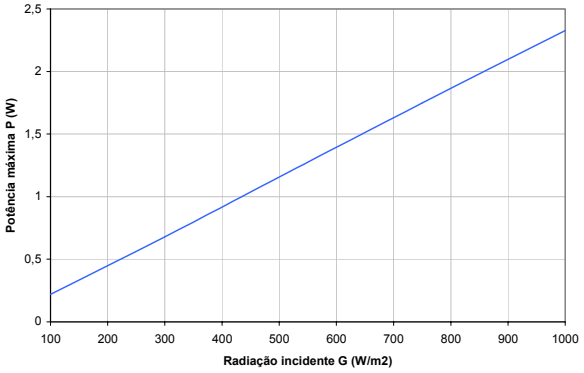

Figura 14 – Simulação da variação da potência máxima com a radiação incidente de uma célula; modelo de quatro parâmetros; T = T^r

A principal conclusão é a acentuada dependência da potência máxima relativamente à radiação incidente, o que tem um impacto notório na energia produzida.

D. Modelo fotovoltaico – cinco parâmetros

O modelo de quatro parâmetros não é uma representação rigorosa da célula fotovoltaica. Nas células reais observa-se uma queda de tensão no circuito até aos contactos exteriores, a qual é representada por uma resistência série, R_S, que se inclui no modelo de quatro parâmetros.

Do mesmo modo, também existem correntes de fuga, que podem ser descritas por uma resistência em paralelo, R_P, e que está discriminada no modelo de cinco parâmetros que se apresenta na figura 15.

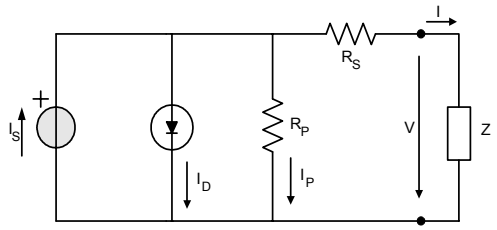

Figura 15 – Circuito eléctrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z; modelo de cinco parâmetros

A corrente I_P que circula através da resistência R_P é dada por:

$$I_P = \frac{V + R_S \times I}{R_P} \tag{16}$$

A corrente que circula pela carga é

$$I = I_S - I_D - I_P = I_S - I_0\left(e^{\frac{V + R_S \times I}{m \times V_T}} - 1\right) - \frac{V + R_S \times I}{R_P} \tag{17}$$

A equação (17) é uma equação transcendente, implícita em *I*, que sem os dados proporcionados pelo modelo de quatro parâmetros, teria que ser resolvida com recursos a métodos iterativos.

De acordo com o tipo da equação, que implica um sistema de equações não lineares, os métodos iterativos do ponto fixo e de Newton Generalizado são adequados para resolução do problema.

No modelo de quatro parâmetros são fornecidos alguns dados fundamentais para a resolução da equação. Esses dados estão representados na tabela 5.

Tabela 5 – Características do modelo de quatro parâmetros calculadas para uma célula fotovoltaica BP Solar® BP 2150 S

m	1
$\mathbf{V_T}$	0,0257 V
$\mathbf{R_S}$	0,011 Ω
$\mathbf{I_S}$	4,75 A
$\mathbf{I_{max}}$	4,45 A
$\mathbf{V_{max}}$	0,47 V

Através da equação 17 e das grandezas apresentadas na tabela 5 podemos determinar o valor de R_P. O valor obtido foi $R_P = 670\ \Omega$.

5. Conclusões

Partindo-se da abordagem de alguns aspectos físicos sobre a constituição de um sistema fotovoltaico, após a recolha de dados experimentais que permitem caracterizar o seu funcionamento, foram apresentados dois modelos fotovoltaicos. Por simulação, com base nestes modelos, obtiveram-se as respostas dos mesmos, as quais foram comparadas com os dados experimentais, por forma a testar a validade daqueles.

No modelo de quatro parâmetros, o desempenho é bastante aceitável, apresentando uma grande semelhança em relação aos valores obtidos experimentalmente.

O modelo de quatro parâmetros desenvolvido e implementado, consiste numa fonte de corrente, um díodo e uma única resistência. Todos estes componentes têm características e parâmetros não mensuráveis que não podem ser obtidos directamente do fabricante. Podem, porém, ser determinados analiticamente, a partir dos dados disponíveis e de algum formalismo matemático.

O modelo de cinco parâmetros é baseado num circuito equivalente igual ao modelo de quatro parâmetros, apenas com a introdução de uma resistência em paralelo. Se se desconhecerem as características fornecidas pelo modelo de quatro parâmetros, o modelo de cinco parâmetros origina um sistema de equações não lineares que é resolvido através de métodos iterativos.

Alguns autores como Fry [3], consideram o modelo de quatro parâmetros como o modelo correcto para células de silício monocristalino e policristalino, como é o caso do módulo fotovoltaico a que se refere este estudo. Pelo contrário, para células de silício amorfo, o modelo de cinco parâmetros apresenta melhor desempenho.

Referências

[1] Andreev, V. M.; Grilikhes, V. A. e Rumyantsev, V. D., "Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight", Wiley, 1997.

[2] Castro, Rui, "Introdução à Energia Fotovoltaica", Energias Renováveis e Produção Descentralizada, DEEC / Secção de Energia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2002.

[3] B, Fry, "Simulation of Grid-Tied Building Integrated Photovoltaic Systems", University of Wisconsin – Madison, College of Engineering's Solar Energy, Lab (SEL), Msc Thesis, 1998.

[4] Asch, George, "Les Capteurs en Instrumentation Industrielle", Dunod, Paris, 1998.